衝撃工学の最前線

2. 高速衝撃現象の数値解析法[†]

片山雅英*

The Front Line of Impact Engineering

II : Numerical Analysis Method on Shock Physics and Explosion Phenomena

by

Masahide KATAYAMA*

Key words : Chapman-Jouguet, Condensed matter, Detonation, Hugoniot, Hydrocode, Hypervelocity impact, Shock impedance, Shock-induced vaporization, Shock velocity, Spalling (Scabbing)

1 緒言

本稿とは別の機会に比較的詳しく述べたように,¹⁾日本では認知度が低い、衝撃波は気相だけではなく凝縮相(液相と固相)媒質中にも発生する。気相媒質においては、衝撃波は、通常、マッハ数によって特徴付けられるが、衝撃波自身の定義には様々な議論がある。²⁾気相・凝縮相両方の媒質中における衝撃波の発生を論じるための、より一般的かつ有効な判断基準は圧力・密度等の示強量の不連続性について調べることであろう。多くの場合、この不連続面は空間的には局在化するが、通常、数百～数千 m/s という位相速度(衝撃波の伝ば速度)で移動するため、単一の媒質中に発生する衝撃波であっても、対象とする系の境界面の条件に応じて極めて過渡的で複雑な反射と重ね合わせの形態を示す。また、多媒質を対象とする系では、それぞれの媒質中の位相速度が異なるため、反射に加えて透過過程が問題をさらに複雑化する。一方、加速・減速過程が伴う場合には、媒質の粒子速度によって衝撃波の位相速度が変化することが知られているため、非常に強い非線型性を持つ結果となる。

一方、周知のように、通常、固体が変形を受けると固体中に生じる応力値は変形(ひずみ)の増大と共に減少する、いわゆる、加工硬化を生じる。そのため、応力のひずみに対する微係数に関連付けられる位相速度はひずみの増大と共に減少し、固体中に衝撃波は発生しないことになってしまう。これは、高速変形状態下の固体材料の応力-ひずみ関係は、静的変形状態時よりも、ひずみ速度の増大と共に応力値が上昇するという事実(ひずみ速度依存性)を考慮したとしてもなお不十分である。この説明のためには、固体に対しても静水圧成分を導入して状態方程式を適用する必要がある。日本語の「衝撃」という言葉に相当する英語として、“shock”と“impact”という用語が用いられあまり厳密に区別されることはな

いが、本稿では、“impact”よりは“shock”寄りの現象に対する数値解析法について述べることにする。

2 連続体力学による定式化

一般に、固体中に衝撃波が生じるようなエネルギー密度の大きな力が作用する現象では、しばしば液化や気化、さらには、プラズマ化のような相変化を生じる。このように、衝撃問題においては、対象とする物理系に物質の3相が混在し、しかも複雑に関係し合うのが一般である。そのため、例えば、「流体力学」を「気体の力学」と「液体の力学」に細分化するのではなく、それらを統一的に取り扱う「連続体力学」として捉えるのが有効かつ効果的である。この連続体という概念は、数学基礎論の連続性に起源があり、連続体をいくら細分化しても不連続性が現れないような媒体を仮定するものである。

固体と流体の区別は、応力とひずみのせん断成分・偏差成分の有無、材料強度の有無にある。さらに換言すれば、後述の構成則(constitutive equation)が有意か否かにある。連続体力学においては、固体と流体の両方に対して、同一の、i) 連続の式、ii) 運動方程式、iii) エネルギーの式の3つの基礎式が立てられる。これらの式は、それぞれ、質量、運動量、エネルギーの各保存則に相当する。このうち、運動方程式のみがベクトル方程式であるが、空間を1～3のいずれの次元を仮定しても、スカラー方程式の数に対し変数の数が1つ多くこれらの基礎式だけでは解けない。しかし、これらの基礎式に含まれる3つの状態変数で記述した、その連続体物質の特性を規定する状態方程式(equation of state: EOS)を連立させることによって解くことができる。熱力学によれば、熱力学的状態量は、10種以上定義することができるが、独立に変化するものは2つのみである。通常、衝撃解析法では、密度(ρ)と単位質量当りの比内部エネルギー(E)を独立変数として圧力(P)を従属変数とする $P=f(\rho, E)$

[†] 原稿受理 平成22年8月17日 Received Aug. 17, 2010 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム事業部 〒100-6080 東京都千代田区霞が関, Sci. & Eng. Systems Division, ITOCHU Techno-Solutions Corporation, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-6080

という形の状態方程式が採用される。このため、固体に対しても圧力を定義することにより、圧力と応力が相互に反映させられる。すなわち、圧力が主応力成分 (σ_{ij}) の平均値: $\sigma_0 = (1/3)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ と $P = -\sigma_0$ なる関係 (圧力は圧縮が正、応力は引張りが正を仮定する。) にあると仮定すれば、全応力テンソル (σ_{ij})、偏差応力テンソル (τ_{ij}) および圧力の間には、 $\sigma_{ij} = \tau_{ij} - P\delta_{ij}$ なる関係が成立する (ただし、 δ_{ij} は Kronecker のデルタ。)。このように表すことによって、流体は偏差応力成分が全て 0 の状態として固体と同様に扱うことができ、逆に、固体に対しても圧力を導入することができ熱力学とのリンクが可能になる。また、内部エネルギーは固体の偏差ひずみ成分の増分としての非可逆な塑性ひずみエネルギー、および可逆なエネルギーである熱力学的仕事の和として評価される。固体に対しては、偏差成分を評価するために、状態方程式だけではなく、応力-ひずみ関係に代表される構成則が連立して解かれる。とくに、衝撃力が大きな問題では、固体においても偏差成分に比べて静水圧成分が卓越するため流体的挙動を示すことになる。

3 高速衝撃問題の数値解法

第 2 章で述べたように、連続体力学によれば物質の 3 相に対して同一の基礎式が適用できる。この基礎式から双曲型の 2 階の偏微分式で表せる波動方程式が導かれ、連続体中を音速という位相速度で擾乱が伝ばする現象を解いていることになる。しかし、第 1 章で述べたような激しい衝撃現象を解くためには、連続体が強い衝撃力によって加速された結果、粒子速度が u_p まで加速され、衝撃面の位相速度が衝撃波速度 (U_s) にジャンプする条件を用いて、Rankine-Hugoniot の式を導入する。衝撃後の圧縮状態はこれら 2 つの量を用いて決定することができるが、多くの物質の凝縮相では、 $U_s = c_0 + a \cdot u_p$ (ただし、 c_0 と a は超高速衝突試験等によって決定される物性値で c_0 はバルク音速と呼ばれる。) という線型関係が良い近似で成り立つことが実験的に知られており、多くの物質に対するこれらの物性値が、米国の研究機関などから公開されている。^{3)~6)} 以上で述べた式等の内容の詳細については、例えば、^{2), 7), 8)} などの文献を参照されたい。

ところで、これらの基礎式の定式化の方法には、連続体の変形と共に計算格子が動いて行く Lagrange の方法、

および、計算格子は空間に固定させて、その上を連続体が移動して行く Euler の方法がある。これらの方法は、その特徴から、それぞれ、物質表示法、空間表示法とも呼ばれる。一般的には、前者は固体の表現に、後者は流体の表現に適している。高速衝撃問題への適用という観点からは、Euler の方法でも、1 つの Euler 計算メッシュの中に複数の物質を考慮することのできる multiple material Euler 法と呼ばれる計算機能が不可欠であるといっても過言ではない。他方、Lagrange の方法の場合には、著しい変形を受けた計算メッシュをある規則に基づいて削除し、新しい相互作用面を自動的に設定する数値的エロージョンと呼ばれる機能が有効である。

また、Euler の方法と Lagrange の方法の統一解法、または自動格子改善法として位置付けられる、ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 法⁹⁾ も問題によっては有効な方法である。さらに、薄いために厚さ方向に十分な計算メッシュを設定することができない構造物や、断面に比べて長い棒状の構造物を模擬するためには、Lagrange の方法の一種であるシェル要素やビーム要素なども、多様な物理系をモデル化するためには必須であると言える。

空間の離散化に際して、以上で述べたように計算格子 (メッシュ) を用いるのではなく、図 2 に示すような粒子法、もしくはグリッドレス法と呼ばれる定式化方法の 1 つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法¹⁰⁾ も有用である。この方法も連続体力学に基づいた定式化法であり、これまでの手法と同様に、状態方程式や構成則を適用することができる。1970 年代後半の開発当初は、天体の衝突現象など、スケールが大きくて衝突速度の大きな (数十 km/s) 問題に適用されたため、重力項が卓越し、固体の材料強度は無視された。1990 年頃になって、スペースデブリの衝突問題 (第 5 章参照) などのスケールの小さな超高速衝突問題への適用の必要性のために、SPH 法に構成則と破壊則を導入する努力がなされ、¹¹⁾ その後研究的成果だけではなく、商用コードにも導入された。しかし、この方法も万能ではなく、3 次元モデルでは粒子の個数が多くなり影響粒子を自動検知するために過大な計算時間を要したり、膨張過程では粒子が孤立して状態量が正しく評価できなくなったり、メッシュ依存性の代りに初期の粒子配置が計算結果に大きな影響を及ぼすなどの問題があることの認識も必要である。

図1 Lagrange と Euler の方法を比較する模式図

図2 SPH 法の概念図

爆ごう速度、生成気体の平均比熱比（これが決まれば、理想気体の状態方程式が決定できる。）等の状態量を一意的に決定することができる。一方、爆薬に関しては、シリンダー膨張試験と呼ばれる爆発実験と数値解析に基づいて、様々な高性能爆薬に対して、上述の反応性予混合気と類似した爆ごうパラメータが決定され、公開されている。衝撃解析コードで最もよく用いられている爆薬の爆ごうパラメータは、米国のローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) で開発され、発展してきたJWL (Jones-Wilkins-Lee) の状態方程式とそのためのデータ群¹⁴⁾である。

以上で述べたC-J爆ごう状態は点火と同時に生じるのではなく、実際には点火後加速されながら成長した後定常状態が達成される。この過程をDDT (Deflagration to Detonation Transition)、点火点から爆ごう開始点までの距離を爆ごう誘導距離 (detonation induction distance) と呼び、後者は反応物質の爆ごうし易さを表わす特性の一つとされている。爆薬やロケット推進薬に対するこの過程に関しては、数値解析的手法としても米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) のForest Fire Model、LLNLのLee Tarver Model、産業技術総合研究所（産総研）の田中克己氏による方法等が提案され適用が試みられている。

ここでは、これらの複雑な点火・成長 (Ignition and Growth) 過程は無視し、点火後直ちに定常的に爆ごう波が伝ばすると仮定する最も簡単なモデルを紹介する。図4に示すように、計算メッシュを爆ごう性物質が満たし、時刻 $t = 0$ に点火点位置で爆ごうが開始される場合を考える。点火点から濃い灰色で塗りつぶした注目メッシュまでの最短距離 (d_1) と最長距離 (d_2) は、点火点の座標値とメッシュの全節点の座標値から容易に計算することができる。一方、爆ごう波は一定の速度で伝ばする ($V_D = \text{const}$) という仮定から、そのメッシュが燃え始める時刻 (t_1)、および燃え終わる時刻 (t_2) を算出できる。この燃焼時間内に、前項で述べた、反応物質の密度と比内部エネルギー（共に、爆ごうパラメータの1つ）を用い、 $P = f(\rho, E)$ という形の状態方程式に代入することによって圧力を評価する。これ以降は、通常の衝撃解析法の基礎式を解くためのスキームに従って、力、速度場、ひずみ場等が計算され、次の時間積分ステップの計算に繋がる。した

がって、気体爆ごうの場合に、衝撃解析法の入力データとして準備すべき爆ごう計算関係のデータは、i) 爆ごう速度 (V_D)、ii) 反応気体の比内部エネルギー (E_0)、iii) 反応気体の密度 (ρ_0)、iv) 状態方程式の4つである。iv) については、気体爆ごうの場合は理想気体の状態方程式を仮定して爆ごうパラメータの1つである生成気体の比熱比 (γ) が分かれば状態方程式の形が決定できる。一方、爆薬の場合には、前述のJWLの状態方程式と爆薬に応じて決定された物性値を用いることができる。次にJWLの状態方程式を示す。

$$P = A_{JWL} \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) \exp \left(-\frac{R_1}{\eta} \right) + B_{JWL} \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) \exp \left(-\frac{R_2}{\eta} \right) + \omega \eta \rho_0 E$$

ただし、 $\eta = \rho/\rho_0$ であり、 A_{JWL} 、 B_{JWL} 、 R_1 、 R_2 、 ω はシリンダー膨張試験等によって決定される物性値である。

このようにして、本来多くの化学反応が関係する極めて複雑な化学系で生じる現象を、かなり簡単な物理過程に置き換えて解くことが可能になる。ここで注意すべきは、計算で用いられる空間メッシュ、時間メッシュ共に有限の大きさを持っており、現実の衝撃波厚さを模擬したものではないことである。従って、上述の燃焼時間内に理想的爆ごうを仮定した一定のC-J圧力を達成させてしまうと、過大なエネルギーを解放する結果になる。この問題を回避するため、急峻な圧力変化を表現するに十分な計算メッシュが存在しない場合には、エネルギーが保存するように、C-J圧力よりも小さな圧力を評価するロジックが採用される。また、現実の爆ごう誘導距離と一見類似したC-J圧力の数値的なビルドアップ過程が存在する。これらのロジックにおいては、空間メッシュ幅や時間積分の刻み幅、内部エネルギーの大きさなどに応じてC-J圧力の達成のさせ方が変化する。

このような比較的単純な爆ごう波伝ばロジックによっても、モデル化に注意することによって十分な精度を持った解析を行うことができる。ただし、爆発物の中に障害物が存在する場合など、別途注意が必要であるが、それらへの対処法も色々と検討され実用化されている。

5 高速衝撃問題の数値解例

5.1 超高速衝突現象の解析

比較的厚い板の前面に強い衝撃力が負荷されると、板の内部にはほとんど損傷を生じることなしに裏面付近にspallingと呼ばれる亀裂を生じることが周知の事実である。これは前面に作用した圧縮波が裏面の自由表面に伝ば・位相反転した結果、裏面近傍に引張モードの応力波（負の静水圧）が発生することによって生じる破壊モードであり、第3章で触れたwave propagation過程が固体の破壊を決定付ける顕著な例である。J. S. Rinehartは1950年代初頭に、爆薬を用いて5種類の金属に対するspalling（当時は、scabbingという用語の方が一般であった。）破壊について、定量的な視点から、実験的かつ理論的に検討を加えた。¹⁵⁾彼はその導入部で、ぜい性材料であるコンクリートの裏面はく離に言及し、定性的には金属に比べてより小さな衝撃力で同じメカニズムによる破壊が生じることを暗に匂わせている。

図4 定常爆ごう過程の模擬方法の模式図

筆者は、スペースデブリ（宇宙ゴミ）の宇宙機への衝突問題^{16), 17)}や小惑星や彗星の地球への超高速衝突の問題^{18), 19)}にも携わってきた。スペースデブリは、地球の周回軌道に蓄積された人類の宇宙活動を起源とするものであり、低軌道と静止軌道でその環境は大きく異なるが、数百 m/s 以上、15km/s 強（低軌道周回速度の2倍）を衝突速度の上限とし、平均密度もアルミニウムとほぼ同じ $3\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であると考えられている。それに対して、小惑星帯や彗星を起源とする地球への飛来物の衝突速度は $11 \sim 72\text{km}/\text{s}$ であり、想定される密度の範囲もスペースデブリの密度の $1/10$ 程度から数倍の程度までと多様性に富んでいる。一般に、小惑星帯からの飛来物の密度は高く、衝突速度は $20\text{km}/\text{s}$ 程度が中心であるのに対し、彗星を起源とする飛来物の密度は低くその代わりに $60\text{km}/\text{s}$ 程度と極めて高速であると考えられている。これら天然起源の飛来物のうち、小惑星や彗星衝突のような大規模衝突ではなく、宇宙機の防護対象となるような小さなものをまとめてメテオロイド (meteoroid) と呼ぶ。

図6 建物内外の爆発解析の解析モデル

図5 水飛翔体が $70\text{km}/\text{s}$ でアルミニウム合金製標的に衝突する過程の衝撃気化の様子

図7 建物内部のガス爆発の解析の概要

図8 建物外部の爆薬の爆発解析の概要 (0.5ms).

ところで、密度 (ρ)、衝撃波速度 (U_s) の連続体が剛壁に超高速 (V_{imp}) で衝突した場合に衝突面で発生する圧力 (P_{imp}) は、運動量保存則から $P_{imp} = \rho \cdot U_s \cdot V_{imp}$ で試算できる。したがって、メテオロイドが宇宙機に衝突した際に生じる衝突圧は、アルミニウムのスペースデブリが 10km/s で宇宙機に衝突した場合の衝突圧 (300GPa 程度) に比べると数倍となり 1TPa を超える。宇宙機の構造材として多用されるアルミニウム合金は、上記のスペースデブリの衝突条件程度以上の衝撃力を受けると、部分的ではなく有意な領域で衝撃による気化を生じる。しかしながら、グラムオーダーの固体を地上で健全なまま 10km/s 以上に加速するのは、現在の技術では困難である。^{16)~19)} の論文では、非気化領域に関しては、地上実験と数値解析との比較検討を行っている。一方、気化領域に対しては Thomas-Fermi-Dirac の半古典的量子統計理論に基づく Tillotson の状態方程式²⁰⁾や LANL の SESAME ライブラリー²¹⁾を利用している。

本節では、新しい適用例として、宇宙機が月や惑星へのミッションを遂行する際に問題となる、彗星起原のメテオロイドがアルミニウム合金製構造物に衝突する際の構造物の被害予測を、破壊モードという観点から実施した数値解析例を示す。直径、長さ共に 5mm の円柱形状の水のメテオロイドが、厚さ 60mm の 2024 アルミニウム合金製の板に、70km/s の速度で衝突した場合を想定する。²²⁾ 飛翔体には SESAME ライブラリー、標的には Tillotson の状態方程式を適用したが、共に衝撃気化の模擬が可能である。標的に対しては構成則も適用したが、衝突圧が HEL (Hugoniot 弾性限界) を遥かに超えるため、あまり重要ではなくその詳細は省略する。ただし、スポール強度は 1GPa を仮定した。計算は 2 次元軸対称の multiple material Euler ソルバーを用い、Euler 計算領域の 4 辺のうち中心軸以外は自由流失境界条件とした。

図 5 は、3ms に至る貫通過程を表している。Tillotson の状態方程式では、物質の状態は 4 つの相に分類される。圧縮モードの凝縮相、膨張モードの凝縮相、気相と凝縮相の混相域、完全気化領域の 4 つである。一方、SESAME ライブラリーでは、同様の表示ができないため、水の境界 (自由表面) のみを表示している。水は初期には凝縮相であるが、その体積膨張の様子からほぼ完全に気化していることがうかがえる。標的側に関しても、中心軸上付近を中心にならかなり広範な領域に衝撃気化が生じている様子を確認できる。別の出力から $0.2\mu\text{s}$ の時点で約 1.2TPa もの最大圧力が標的中に評価されていることが分かっている。 $0.8\mu\text{s}$ 頃から、標的裏面の広い部分および前面の狭い部分に spalling 破壊を生じ、その領域が内部に進行し $3.0\mu\text{s}$ の時点には標的の厚さ方向にほぼ均等に破壊域を生じて、あたかもぜい性材料であるかのような鱗状の破壊形態を示している。

上述の Rinehart が論文で言及したコンクリートのスポール強度はアルミニウム合金よりも約 2 桁小さい、コンクリート版に 10m/s オーダの速度で凝縮体を衝突させた場合、裏面はく離が生じる可能性はあるが、版の内部にま

で有意な破壊が進行することはない。それに対して、1km/s 近い速度で衝突させた場合には、版内部はかなり広い領域に亘って破碎に近い損傷を被る。それに対して、水と同程度の衝撃インピーダンス (ρ, U_s) を持つポリカーボネイトをアルミニウム合金に約 7km/s で衝突させた場合、前面のクレータと裏面付近の spalling は生じるが、バルクには深刻な損傷は生じないことが確認されている。¹⁶⁾ 今回の計算例は、約 10 倍の速度で衝突させたため、日常的には延性を示す材料もこのような極限状況ではぜい性的破壊形態を示すことを表している。ただし、今回の事例では、破壊条件だけではなく、衝撃気化過程も相乗効果を持たせる役割を担っていることに注意する。

5・2 建物内外での爆ごう解析

本節では図 6 に示すような鉄筋コンクリート建築物の内部で水素と空気の混合気体が爆ごうする場合と、外部で C-4 という高性能爆薬が爆ごうする場合の解析事例²³⁾を示す。コンクリートと爆薬は Lagrange、鉄筋はビーム、鋼製ライナーはシェル、予混合気体と空気は multiple material Euler の各ソルバーで模擬し、必要に応じてソルバー間の相互作用条件や境界条件を設定した。Lagrange 系要素には数値的エロージョンを考慮し、エロージョン後運動量を保持した質点とする機能を適用した。

図 7 には建物内部でのガス爆発解析の結果の概要を示す。25ms に至る比較的早い段階の爆ごう波伝ば過程とその後の空気中への圧力波伝ば過程、および建物の変形の様子が概観できる。窓ガラスが割れてエロージョンした粒子が飛散したり、建物外にガスが漏れて行く様子などが確認できる。図の右側には、50ms の、コンクリートの塑性域と損傷域の分布、および鉄筋と鋼製ライナー塑性域の分布の状況を示す。混合気体に比べて密度の高いこれらの構造物の変形には、運動量伝達と慣性の関係上、かなりの時間を要することが分かる (cf. 次結果)。

図 8 には、建物外部に接触して設置された爆薬の爆発解析の 0.5ms の結果を、爆薬付近のコンクリートと鉄筋の損傷に焦点を絞った 3 つの寸描を示す。鉄筋コンクリート壁に大きな貫通口が生じていることを確認できる。

6 結 言

以上では、衝突速度にすると 1km/s 以上の英語で “hypervelocity impact” と呼ばれる超高速衝突現象と爆ごう現象を模擬するための数値解析の定式化法の概要について述べると同時に、関連する物理についても概観した。第 5 章では 2 つの代表的な現象の数値解析例を示したが、紙数の制約上詳細については割愛した。必要に応じて、関連する参考文献を参照されたい。

数値解析に際しては、対象とする問題の物理系を十分に検討した上で、用いる解析モデルがそれを正しく評価できるものかどうかを照査することが肝要である。数値モデル上の基礎式、解析手法、解析精度、とくに衝撃問題においては材料モデルをはじめとする諸条件の適用範囲など、基礎に戻って十分な検討を加える必要がある。

一方では、近年の飛躍的な進歩を遂げた現在のコンピュータを以ってしても、大規模な多次元解析には不十

分であることは明らかである。CPU、主メモリに、それぞれ、現在の106倍の向上があったとしても、問題によってはまだ不十分である。上記のような要件に注意しながらより現実的なモデル化を行なう姿勢が重要である。

最後に、第5章に示した計算事例は、すべてANSYS AUTODYNを用いて解析したものであることを記す。

参 考 文 献

- 1) M. Katayama, "Kougi : Kotai-chu no shogekiha no kagaku nyumon", Journal of Japan Laser Processing Society, Vol.17, No.1, 2, pp.42-48 (2010).
- 2) H. Sato, M. Katayama, T. Ashikaga and K. Takayama, "Shogekiha to sono teigi ni taisuru heiban shogeki jikken ni motodoku kousatsu", Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.49, No.572, pp.63-67 (2008).
- 3) S. P. Marsh (Ed.), "LASL shock Hugoniot data", (1980) University of California Press.
- 4) M. van Thiel, "Compendium of shock wave data", (1977), UCRL-50108, Lawrence Livermore Laboratory.
- 5) B. J. Kohn, "Compilation of Hugoniot equations of state", (1969), AFWL-TR-69-38, Air Force Weapons Laboratory.
- 6) R. F. Trunin, "Shock compression of condensed materials", (1998) Cambridge University Press.
- 7) M. Katayama, Sec.15.5, pp.443-460 [G. Yagawa, N. Miyazaki (Eds.), "Keisan Rikigaku Handobukku", (2007) Asakura Publishing Co., Ltd.].
- 8) Y. Syono, Sec.8.1, pp.203-218, [T. Hayashi, K. Tanaka (Eds.), "Syogeki Kogaku", (1988) Nikkan Kogyo Shimbun Ltd.].
- 9) A. A. Amsden and C. W. Hirt, "YAQUI : An arbitrary Lagrangian-Eulerian computer program for fluid flow at all speeds", (1973), LA-5100, Los Alamos Scientific Laboratory.
- 10) L. B. Lucy, "A numerical approach to testing the fission hypothesis", The Astronomical Journal, Vol.82, pp.1013-1024 (1977).
- 11) L. D. Libersky and A. G. Petschek, "Smoothed particle hydrodynamics with strength of materials", Proceedings of the Next Free Lagrange Conference, Vol.395, H. Trease, J. Fritts and W. Crowley (Eds.), pp.248-257 (1991) Springer-Verlag.
- 12) J. Von Neumann and R. D. Richtmyer, "A method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks", Journal of Applied Physics, Vol.21, Issue 3, pp.232-237 (1950).
- 13) M. W. Chase, Jr., (Ed.), "NIST JANNAF thermochemical tables", Journal of Physical and Chemical Reference Data, Monograph No.199 (1998), National Institute of Standards and Technology U.S..
- 14) B. M. Dobratz and P. C. Crawford, "LLNL explosives handbook : properties of chemical explosives and explosive simulants" (1985), UCRL-52997-Chg.2, Lawrence Livermore National Laboratory.
- 15) J. S. Rinehart, "Some quantitative data bearing on the scabbing of metals under explosive attack", Journal of Applied Physics, Vol.22, No.5, pp.555-560 (1951).
- 16) M. Katayama, S. Kibe and S. Toda, "A numerical simulation method and its validation for debris impact against the Whipple bumper shield", International Journal of Impact Engineering, Vol.17, pp.465-476 (1995).
- 17) M. Katayama, A. Takeba, K. Nitta, S. Kawakita, H. Matsumoto and Y. Kitazawa, "Integrity assessment of the spacecraft subjected to the hypervelocity impact by ceramic and metal projectiles simulating space debris and micrometeoroids", Material Science and Engineering B, Vol.173, pp.148-154 (2010).
- 18) S. Nonaka S, K. Okano, K. Takayama and M. Katayama, "Numerical simulation of hypervelocity impacts and its related topics", Proceedings of International Symposium on Planetary Impact Events and their Consequences on Earth (1999), Yamaguchi Univ., Japan.
- 19) T. Saito, K. Kaiho, A. Abe, M. Katayama and K. Takayama, "Hypervelocity impact of asteroid/comet on the oceanic crust of the earth", International Journal of Impact Engineering, Vol.35, pp.1770-1777 (2008).
- 20) J. H. Tillotson, "Metallic equations of state for hypervelocity impact" (1962), GA-3216 General Atomic, CA.
- 21) K. S. Holian (Ed.), "T-1 Handbook of material properties data bases (Vol.Ic: equation of state)" (1984), LA-10160-MS, Los Alamos National Laboratory.
- 22) M. Katayama, "Numerical experiment to simulate the brittle fracture behavior of ductile material at ultra-high velocity impact", Proceedings of the 11th Hypervelocity Impact (2010), Freiburg, Germany.
- 23) M. Katayama, "Bakuhatsu genshou no suuchi kaiseki hou", Bouei-Shisetsu Gakkai Shi (MIRAI), Vol.10, pp.56-71 (2010).